



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 004.89:656.6:629.072

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>

Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей



Максим КУДРОВ



Кирилл БУХАРОВ



Даниил МАХОТКИН



Рафаэль АЙВАЗОВ

Максим Александрович Кудров¹, Кирилл Дмитриевич Бухаров²,
Даниил Русланович Махоткин³, Рафаэль Сергеевич Айвазов⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия.

✉ ¹ kudrov.ma@mipt.ru.

АННОТАЦИЯ

Одной из наиболее бурно развивающихся транспортных технологий в настоящее время является создание автономных (безэкипажных) надводных судов для коммерческого, технического и вспомогательного флота. Ключевым вопросом её внедрения является создание комплексной системы управления (КСУ) безопасным движением БЭС в автоматическом режиме по маршруту. При этом нужно иметь в виду

специфику морской навигации и плавания по внутренним водным путям.

Проведён аналитический обзор базовых алгоритмов управления по курсу и скорости. Сформулированы основные проблемы создания комплексной системы управления безэкипажным судном. Приведена постановка задачи управления и определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: водный транспорт, автоматизированная система управления, безэкипажное судовождение, навигация.

Для цитирования: Кудров М. А., Бухаров К. Д., Махоткин Д. Р., Айвазов Р. С. Постановка задачи управления автономным надводным судном для внутренних водных путей // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время создание безэкипажных судов (БЭС) для коммерческих морских перевозок, технического и вспомогательного флота находится в фокусе внимания ведущих морских держав, поскольку позволит повысить безопасность и эффективность судовождения. Одним из ключевых вопросов, которые необходимо решить для создания безэкипажного судна, является создание комплексной системы управления (КСУ) безопасным движением БЭС в автоматическом режиме по маршруту.

Системы адаптивного управления движением (САУД) являются передовым классом автоматизированных систем управления судном. Как отмечают Г. Э. Острцов и Л. М. Клячко, авторы ряда работ (в том числе, [1; 2]) к которым мы будем неоднократно обращаться, САУД способны оценивать параметры движения и изменять коэффициенты регулирования в зависимости от условий эксплуатации. Однако даже современные САУД используются в основном в открытом море, где нет ограничений по маневрированию и отклонению от курса. Задача автоматического управления судном в речных акваториях и при расхождении с другими судами в условиях волнения, течения и ветра до сих пор полностью не решена.

Целью исследования является формулировка базовых задач, связанных с повышением степени автоматизации управления для создания безэкипажных судов, в том числе эксплуатируемых на внутренних водных путях, и определение дальнейших направлений исследований в этой области.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аналитический обзор алгоритмов управления

Автоматическая проводка судна из одной точки в другую является сложной задачей управления, которая ставилась и ранее (напр.: [3]), но приобрела сейчас по мере развития автономного судовождения особую актуальность (напр.: [4–7]).

Достаточно широко известен подход к упрощению данной задачи путём её разделения на две основные задачи, которые можно рассматривать как самостоятельные:

- управление траекторией и курсом судна, не учитывая изменение скорости хода;
- управление скоростью хода, которое достигается изменением режима работы главной двигательной установки.

При таком разделении можно снизить порядок рассматриваемой системы уравнений движения и упростить процедуру синтеза алгоритмов.

Алгоритмы управления по курсу

Первые авторулевые системы работали на основе пропорциональных (П) законов управления, формулы которых представлены, например, в упомянутой выше работе [1]. При этом, как это отмечается в ней, линейный П-закон управления не обеспечивал устойчивость замкнутой системы автоматического управления движением по курсу на среднетоннажных судах, и судно не могло удерживать заданный курс без колебаний с амплитудой до двух градусов. Использование таких авторулевых систем на крупнотоннажных судах было невозможно [1].

В связи с этим были разработаны авторулевые системы с пропорционально-дифференциальным (ПД) законом управления. Эти системы показали себя более эффективными в условиях волнения и были оснащены датчиками угловых скоростей, а также надёжными аналоговыми элементами. В законе управления по-прежнему использовался коэффициент усиления k , но также добавлялся дифференциальный член, который позволял более точно управлять курсом судна. Формула для такого закона управления выглядит следующим образом [2]:

$$\frac{d\delta}{dt} = k_1 \cdot \Delta\varphi + k_2 \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

Авторулевые разработки имели конечной целью стабилизацию курса судна. Для этого был разработан авторулевой, который использует пропорционально-интегрально-дифференциальные законы управления (ПИД), формулировка которых также содержится в [1].

При ручном управлении рулевым приводом количество переключений составляет не более 100 в час, но при беспокойном море оно может достигать 1400 в час, что крайне нежелательно.



Для уменьшения перегрузки и срезания высокочастотных составляющих морского волнения был разработан пропорционально-дифференциально-фильтрованный (ПДФ) закон управления, который срезает высокочастотные составляющие морского волнения [1; 2].

Затем была создана адаптивная система управления движением (САУД) с блоком оценивания измеряемых параметров и «блоком подстройки коэффициентов регулирования при изменении условий эксплуатации. Такие самонастраивающиеся САУД с автономной адаптивной перестройкой параметров или с использованием информации об условиях плавания для перестройки закона управления, а также с блоком прогноза фазового состояния судна и подсистемой диагноза начали выпускаться во всем мире» [1; 2].

Авторы [2] со ссылкой на зарубежные источники результатов мореходных испытаний указывают, что «подстройка коэффициента передачи k_1 снижает расход топлива на 2 %, а использование оценок при формировании законов управления сокращает время рейса на 2 %» [2].

Управление движением по маршруту

В общем случае маршрут перемещения судна состоит из последовательности прямых и кривых отрезков. Требование к прохождению каждого отрезка обычно устанавливается величиной допустимого бокового отклонения от него. Может потребоваться корректировка выбранного маршрута, например, для расхождения с другими судами или из-за неблагоприятных условий в районе движения.

Автоматическое управление движением судна особенно широко применяется на открытой воде, где не требуется активное маневрирование. Однако и при автоматическом управлении существует необходимость гарантировать попадание судна в заданные точки маршрута, особенно при наличии внешних возмущений, таких как ветер и волны, что существующие системы автоматического управления не гарантируют даже при использовании ПИД закона управления (см., напр. [1]).

С появлением спутниковых навигацион-

ных систем появилась возможность определить координаты судна в любой момент времени, а, следовательно, автоматизировать движение судна по маршруту, состоящему из набора точек с известными координатами.

Технологии использования САУД с приёмником спутниковой навигации подробно рассматриваются в целом ряде источников [1; 2; 8].

С учётом рассматриваемых задач и опыта использования САУД, можно сделать вывод, что система управления должна автоматически подстраивать коэффициенты при хождении на малых скоростях и глубинах, изменении загрузки, а также при сильном волнении.

Варианты алгоритмов траекторного управления

Траекторное управление нашло широкое применение в различных областях, в том числе в робототехнике [9; 10], авиации, в том числе беспилотной [11], анализировался данный вопрос применительно к морскому транспорту и в ряде других, помимо вышеуказанных, работ [12].

Алгоритмы навигации – это выполнение двуединой задачи определения собственного положения в пространстве, т. е. определение в каждый текущий момент времени пространственного углового положения (алгоритмы ориентации) и определение в каждый текущий момент времени проекций скорости и координат (счисление скорости и координат) на оси инерциальной системы координат.

Алгоритмы управления служат для расчёта таких команд управления для прихода в точку интереса, то есть для выработки траекторий, при которых относительные координаты транспортного средства и конечной точки его движения одновременно обращались бы в ноль в некоторый терминальный (заключительный) момент времени.

Алгоритмы стабилизации служат для того, чтобы преобразовать управляющие команды, рассчитываемые в наведении, в сигналы, вызывающие повороты рулей, или изменения положения других органов управления, то есть иными словами, чтобы рули

в каждый момент времени отклонялись так, чтобы в конечный момент времени транспортное средство достигло конечной точки (напр.: [13–15]).

Метод наведения по поперечным ускорениям

Траекторией движения называется такая непрерывная кривая, в каждой точке которой вектор скорости транспортного средства направлен по касательной к ней.

Чтобы изменить траекторию, то есть изменить направление движения транспортного средства, нужно повернуть вектор скорости. Поворачивать вектор скорости можно разными способами.

Например, можно создать приращение вектора скорости в поперечном направлении, то есть, иными словами, создать ортогональное к вектору скорости ускорение.

Применяются также (в основном для летательных аппаратов) методы наведения по мгновенному промаху и пропорционального наведения.

Существенную сложность при реализации ПИД-регулятора угла курса представляет наличие зашумлённости измеряемого сигнала угла курса вследствие волнения морской поверхности. Кроме того, в регуляторе угла курса необходимо знать так же и скорость рыскания; если её величину получать простым дифференцированием сигнала угла курса, то зашумлённость сигнала будет расти.

В случае применения метода управления по мгновенному промаху к судам вектор полного ускорения будет иметь одну нулевую компоненту. Управление судном по поперечному ускорению труднореализуемо на практике в силу особенностей органов управления, но возможно осуществить пересчёт ускорения в соответствующую угловую скорость рыскания и управлять через этот параметр.

Алгоритмы управления в канале скорости

Вопросы построения алгоритмов управления скоростью судна в отечественной литературе не рассмотрены достаточно подробно. Традиционно, алгоритм управления обобщённым параметром – эквивалентом тяги строится на основе ПИД или ПИ-регулятора по скорости. Канал скорости, по всей

видимости, не представляет трудности для регулирования.

Ввиду этого, целесообразно использование алгоритмов управления эквивалентом тяги.

Пусть известна текущая скорость судна V и заданная скорость V_3 . Тогда можно получить заданное изменение скорости $\dot{V}_3 = R(p)(V_3 - V)$, где $R(p)$ – некоторый оператор управления, $\dot{V}_{3min} \leq \dot{V}_3 \leq \dot{V}_{3max}$.

Затем формируется сигнал управления эквивалентом тяги:

$$\mathcal{Q}_{m3} = K_1 \dot{V}_3 + \frac{K_2}{p} (\dot{V}_3 - \dot{V}),$$

$$\mathcal{Q}_m^{min} \leq \mathcal{Q}_{m3} \leq \mathcal{Q}_m^{max},$$

где $\mathcal{Q}_m^{min}$ и $\mathcal{Q}_m^{max}$ соответствуют режимам «малый ход» и «полный ход». Эквивалент тяги используется для того, чтобы получить линейную систему. Далее его нужно пересчитать в реальную тягу. Коэффициенты K_1 и K_2 могут быть функциями скорости хода или иных параметров.

Возможны несколько способов для повышения устойчивости:

- введение в алгоритмы управления «тяжёлого» фильтра на управляющее воздействие, приходящее на привод;
- использование попеременного включения-отключения привода, по аналогии с ШИМ-управлением (широтно-импульсная модуляция).

Оба способа снизят быстродействие системы и перед внедрением необходимо оценить эффективность их применения.

Приведённый базовый алгоритм управления скоростью судна может использоваться в качестве первого приближения при синтезе алгоритмов управления в канале скорости.

Постановка задачи траекторного управления

Алгоритм должен обеспечивать выработку команд управления исполнительным механизмом для следования по маршруту, задаваемому последовательностью промежуточных пунктов маршрута (ППМ). Последовательность ППМ формируется на основе маршрутного задания с учетом правил навигации и окружающей обстановки. Алгоритм





Рис. 1. Принципиальная схема работы алгоритма управления [составлена авторами].

должен обеспечивать минимизацию отклонения судна от отрезков, соединяющих ППМ.

Задачи заключаются в следующем:

- управление рулями, двигателями и подруливающим устройством;
- управление безразмерной скоростью рыскания $\bar{\omega} = \frac{\omega L}{V} = R^{-1}$;

- стабилизация заданной линии пути (ЗЛП);
- переключение между ЗЛП с боковым упреждением разворота (БУР).

В каждый такт работы алгоритм получает на вход следующие параметры:

- векторы координат трёх поворотных пунктов маршрута (ППМ) x_1 , x_2 и x_3 , образующих две заданные линии пути (x_1 , x_2) и (x_2 , x_3) (от модуля планирования маршрута);
- вектор координат судна x [м]; скорость рыскания ω_y [град/с]; вектор путевой скорости V_k [м/с] (от системы навигации).

Выходными параметрами являются:

- заданное положение руля направления δ_s [град] (на привод руля);
- сигналы заданных оборотов подруливающего винта n [об/с] (на блок управления подруливающим устройством, в режиме швартовки);
- сигналы заданных оборотов двигателей n [об/с] (на электронный блок управления двигателем).

Принципиальная схема работы алгоритма следования по маршруту представлена на рис. 1. В алгоритм от модуля планирования маршрута поступают тройки промежуточных

точек маршрута и флаг `ext_reset`, который сигнализирует алгоритму следования по маршруту о получении новой тройки ППМ. В свою очередь, алгоритм следования по маршруту передаёт в модуль планирования маршрута флаг подтверждения `PL_flag` при переходе на вторую линию пути.

Направления дальнейших исследований

К их числу относятся:

- разработка адаптивной математической модели динамики движения судна для подстройки системы управления под различные суда и под различную загрузку судна;
- реализация режимов управления на малом ходу для швартовки с использованием подруливающих устройств, а также для удержания точки и маневрирования в порту;
- совместное управление по курсу и скорости для повышения точности решения задачи управления;
- оценка скорости и направления движения, например, по доплеровскому лагу относительно дна для компенсации шумов по курсу и скорости;
- оценка скорости и направления ветра и течения по погодным датчикам для предупреждающей компенсации возмущений;
- применение внешних контроллеров качества управления для обнаружения отказов, оптимизации ресурса приводов управления и повышения устойчивости решения;
- совместная оптимизация характеристик приводов управления по ресурсу и системы управления по точности выдерживания маршрута (число переключений привода).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён аналитический обзор алгоритмов и систем управления судном по курсу и скорости, выделены ключевые ограничения существующих решений.

На основании аналитического обзора сформулирована постановка задачи траекторного управления автономным судном.

Определены направления дальнейших исследований (создание адаптивной системы для работы на различных судах, работа на малом ходу, совместное управление по курсу и скорости, использование априорной информации от датчиков, устойчивость системы, фильтрация и коррекция сигналов, обнаружение отказов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Острцов Г. Э., Клячко Л. М. Методы автоматизации управления движением корабля. – М.: Физматлит, 2009. – 120 с. ISBN 978-5-9221-1138-6.
2. Острцов Г. Э., Клячко Л. М. Основные этапы автоматизации управления движением морского судна // Судостроение. – 2005. – № 4 (671). – С. 55–59. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=hvejud>. EDN: HVEJUD. Доступ 17.05.2023.
3. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна. – Одесса: Латстар, 2002. – 310 с. [Электронный ресурс]: https://www.studmed.ru/vaguschenko-ll-cymbal-nn-sistemy-avtomaticheskogo-upravleniya-dvizheniem-sudna_7e4e87f6b13.html. Доступ 17.05.2023.
4. Попов А. Н., Бурылин Я. В., Кондратьев А. И. Способ автоматической проводки судна. / Патент РФ 2021. [Электронный ресурс]: <https://findpatent.ru/patent/275/2759068.html>. Доступ 17.05.2023.
5. Zhu Qidan. The research work on the intelligent ship // The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.
6. Yan Xinping. Developments of Maritime Autonomous Surface Ships in China// The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International

High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.

7. Sawada Ryohei. Introduction to research on autonomous ships in NMRI. // The 5th International Conference for Innovation and Cooperation of Naval Architecture and Marine Engineering (ICNAME-2021) & The 1st International High-level Forum on Smart and Autonomous Navigation Technology of Ships 16.11.2021.

8. Белогорцева М. В., Клячко Л. М., Острцов Г. Э. Способ автоматического управления движением судна. Патент RU 2292289 C1. Дата публикации 27.01.2007. Бюлл. № 7. Правообладатель: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. [Электронный ресурс]: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002292289_20070127_C1_RU/. Доступ 17.05.2023.

9. Василенко И. В., Ведякова А. О. Исследование алгоритмов траекторного управления роботом манипулятором // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2022. – Т. 18. – № 1. – С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202201.62-71>.

10. Хоанг Д. Т., Пыркин А. А. Алгоритм траекторного управления движением мобильного робота без измерения координат положения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2021. – Т. 21. – № 6. – С. 858–865. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-858-865.

11. Рогозин О. В., Пенской И. С. Метод траекторного управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом в задаче следования за объектом // Образовательные технологии. – 2019. – № 4. – С. 92–110. [Электронный ресурс]: <https://iedtech.ru/journal/2019/4/trajectory-flight-control/>. Доступ 17.05.2023.

12. Пшихопов В. Х., Федотов А. А., Медведев М. Ю., Медведева Т. Н., Гуренко Б. В. Позиционно-траекторная система прямого адаптивного управления морскими подвижными объектами // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3 (30). – 29 с. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22843876>. EDN: TFXFED. Доступ 17.05.2023.

13. Мавлюдов М., Садовников Ю., Титов В. Интерцепторы – средство управления гидродинамическими параметрами быстрого судна// Катера и яхты. – 2000. – № 170. – С. 48–50. [Электронный ресурс]: <http://sportlib.info/Mirrors/www.katera.ru/170/page19.html>. Доступ 17.05.2023.

14. Антоненко С. В. Судовые движители: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 126 с. ISBN 978-5-7596-0745-8.

15. Hydraulic Steering & Accessories. [Электронный ресурс]: http://www.navalex.com/downloads/KOBELT_Hydraulic_Steering_&_Accessories.pdf. Доступ 17.05.2023. ●

Информация об авторах:

Кудров Максим Александрович – кандидат технических наук, доцент, директор Института аэромеханики и летательной техники (ИАЛТ), директор Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, kudrov.ma@mipt.ru

Бухаров Кирилл Дмитриевич – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, bukharov.kd@mipt.ru.

Махоткин Даниил Русланович – инженер, руководитель проекта Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, mahotkin.dr@mipt.ru.

Айвазов Рафаэль Сергеевич – инженер Передовой инженерной школы радиолокации, радионавигации и программной инженерии Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), Москва, Россия, aivazov.rs@mipt.ru.

Статья поступила в редакцию 08.05.2023, одобрена после рецензирования 11.07.2023, принята к публикации 14.07.2023.

